第 37 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.37,No.5
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201509291983
马钧霆,陈锁忠,何志超,朱晓婷.盐城滨海冲积平原孔隙承压地下水埋深对水质的影响.生态学报,2017,37(5):1583-1594.
Ma J T, Chen S Z, He Z C, Zhu X T.Influence of pore confined groundwater depth on the groundwater quality of the alluvial coastal plain of Yancheng.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1583-1594.

盐城滨海冲积平原孔隙承压地下水埋深对水质的影响

马钧霆[1],陈锁忠[1,2,*],何志超[1],朱晓婷[1]
1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023
2 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:含水层(组)的空间结构不仅决定了地下水的空间分布格局,对地下水水质状况也有一定程度的影响。基于盐城滨海平原水文地质分区内部水文地质钻孔数据及 2005—2014 年水质因子监测数据,综合运用 GIS 及 ANOVA 等方法,研究了实验样区第 III 承压含水层孔隙地下水的水质在时空维度上对含水层顶板埋深变化的响应特征,分析了地下水质动态演变规律,并对研究区地下水管理与保护提出了建议。研究结果表明:该区第 III 承压含水层埋深大多位于-118.9—-85.45m 之间;由于不同埋深的地下水所处的水文地质条件及开采利用状态差异,地下水典型水质因子含量与含水层埋深因素之间呈现出一定相关性:矿化度、总碱度和细菌总数 3 种因子与埋深的关联强度最高(相关度分别为 69.67%、75.76%和 58.09%),总硬度因子的关联强度处于中等水平(49.18%);高锰酸钾指数受埋深影响较小(35.27%);同时还发现,在不同埋深分级区间各因子与埋深的关联强度差异明显,表现出不同的动态演变特征。

关键词:承压含水层;水质因子;含水层埋深;相关关系;动态演变

Influence of pore confined groundwater depth on the groundwater quality of the alluvial coastal plain of Yancheng

MA Junting[1], CHEN Suozhong[1,2,*], HE Zhichao[1], ZHU Xiaoting[1]
1 *Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing* 210023, *China*
2 *Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing* 210023, *China*

Abstract: Pore confined groundwater is an important fresh water resource for human beings. Pore groundwater is stored in systems of loose sedimentary aquifers. The spatial structure of the aquifer (or aquifer group) determines not only the spatial distribution pattern of groundwater, but also has some influence on the groundwater quality. Based on hydro-geological data and groundwater quality monitoring data collected between 2005 and 2014in the Yancheng coastal plain in China, methods including GIS and ANOVA were used to study the relationship between groundwater quality and the third confined aquifer buried depth. The groundwater quality dynamic evolution characteristics are also analyzed. Based on the conclusions, some recommendations are proposed to the local water resources management department. Firstly, based on the hydrogeological data in the study area, the buried depth Digital Elevation Model(DEM) was constructed and divided into 10 grades. The correlation between water quality factors and the aquifer buried depth was analyzed using variance analysis. The least significant difference method was used to determine the influence of different grading intervals on water quality factors. The average value of the monitored data for each year and for each buried depth interval was counted and time varying process curves of water quality factor levels were plotted to show the spatial and temporal variation of water quality factors with aquifer depth. The results showed that: in the study area, the III confined aquifer buried depth is mostly located between -

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41571386);江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA170028)
收稿日期:2015-09-29; **网络出版日期:**2016-07-13
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 09153@ njnu.edu.cn

118.9 m and -85.45 m. Owing to the variety of groundwater hydrogeological condition and different buried depths, some correlation between typical groundwater quality and aquifer buried depth is presented: Mineralization degree, total alkalinity and total bacterial count show the highest correlation with groundwater buried depth (69.67%, 75.76% and 58.09% respectively). Correlation between total hardness factor and depth is moderate (49.18%). The potassium permanganate index is less influenced by the buried depth (35.2%). It was found that, the correlation between each factor and the groundwater buried depth in each buried depth grading interval showed significantly different dynamic evolution characteristics. In the area where the aquifer was deeply buried (-160.8 m to -99.12 m), the total hardness, degree of mineralization and total number of bacteria were significantly affected by the buried depth. The potassium permanganate index content only showed a significant difference with depth in specific depth intervals (between -99.12 m and -92.91 m and between -85.45 m and -75.09 m). In addition, water quality factors showed different spatial distribution characteristics: the area with higher potassium permanganate index and total bacteria is mainly located between Sheyang county and Huangsha Port. The highest mineralization factor content values were found in the middle and western regions, total alkalinity and total hardness factor varied little, the total alkalinity was slightly lower in the shallow buried area, and the total hardness showed some upward trend.

Key Words: confined aquifer; groundwater quality; aquifer buried depth; correlation; dynamic evolution characteristics

孔隙承压地下水广泛分布于平原或盆地中部地带,一般埋藏较深,地质构造封闭,受气候影响小,流量稳定,水质较好且不易受污染,是人类重要的供水水源[1]。随着社会经济快速发展,对地下水资源的需求日益迫切,地下水开采强度逐年增加,地下水环境也随之发生显著改变,引发一系列地下水环境问题,给生态和人类活动造成严重的危害[2]。盐城滨海平原地处中国东部沿海中部,近年来随着人口增加及工农业快速发展,埋藏于地表深处的孔隙承压地下水逐渐成为许多城镇的主要供水源[3-4]。该区内包含第三系和第四系的松散沉积地层,形成巨厚的松散空隙含水系统,其中潜水和第 I 承压含水层中赋存的地下水咸度较高,第 II、III 承压含水层中水水质较好,为主要用水。20 世纪 90 年代以来,随着区域工农业的快速发展,地下水开采量随之剧增,局部地区由于开采集中引发水位下降导致咸水入侵、地面沉降等环境地质问题[5],现阶段对滨海平原地区孔隙承压地下水质分布与演变规律的研究,对于该类型区域地下水资源保护及指导生产具有一定的现实意义。

当前围绕该区域地下水质的研究,大多从地下水质调查分析角度展开研究,如陈红卫[6]提取了盐城市域内 21 眼水质代表井实测数据分析了矿化度、氨氮量等水质因子在空间和时间上的分布趋势;卞锦宇等[7]基于盐城市水质监测资料,采用主控制因子分析法对盐城市地下水质的控制因子进行了分析。此类研究实现了对地下水的时空动态变化特征量化描述和分析,但对该区域对地下水质变化影响因素的研究则较为缺乏。事实上,目前国内外在水质变化影响因素分析方面已有大量研究,如:廖资生等[8]分析了松嫩盆地地下水系统中水质变化趋势的影响因素;韩银利等[9]以银川平原深层地下水勘探为导向,基于电测深资料构建了银川平原冲洪积与河湖积平原区地下水矿化度与含水层电阻率的数学模型,得出了该区域地下水质与电阻率之间的相关性;TangChangyuan 等[10]研究了日本千叶市上游湿地对地下水质的影响,指出湿地对地下水中硝酸盐含量具有一定的抑制作用;Serhal H 等[11]对法国 Cambrai 地区地下水质受肥料以及污染物等因素的影响进行了研究。上述各研究采用不同的手段,得出了不同因素对地下水质的时空分布特征的影响机理,对盐城市滨海水文地质分区内地下水质的动态变化研究提供了有益的参考和借鉴。然而当前对盐城滨海平原水文地质分区内的地下水质的影响因素研究仍较为缺乏,如何结合盐城市滨海平原水文地质特征,分析不同的影响因素与地下水质之间的相关性,对于揭示该区内部地下水质的演变规律和机理具有重要意义。鉴于含水岩层的埋深是含水层空间分布的一个典型特征,对某些地下水水质因子的时空演变特征具有一定程度的影响,故本文从含水岩层空间分布格局的角度出发,围绕地下水质各因子含量与含水层埋深因素之间的相关关系展开研究。

基于研究区水文地质钻孔数据以及水质的动态监测数据,提取钻孔中目标承压含水层的分层信息,构建含水层顶板埋深 DEM,综合运用 GIS 和 ANOVA 统计分析方法,揭示盐城滨海平原水文地质区内部第 III 承压含水层埋深对孔隙地下水质的影响程度,从而为盐城滨海平原孔隙地下水资源的科学管理与保护提供参考。

1　研究区概况及水文地质条件

1.1　研究区概况

研究区位于盐城滨海平原水文地质分区北部,北以苏北灌溉总渠为界,南至斗龙港,介于 33°15′—34°12′N,119°34′—120°41′E 之间,总面积约为 6177.11km^2,如图 1 所示。该平原由近 2000—3000 年来海水和河流不断冲积而成,区域内部水网密布,形成滨海水网平原地貌类型,至今仍在不断向海延伸[12]。区内地势低平,从东南向西北缓缓倾斜。大丰境内地势较高,海拔约 3—5 m,向北逐渐降低,到射阳河处约为 1—1.5 m。

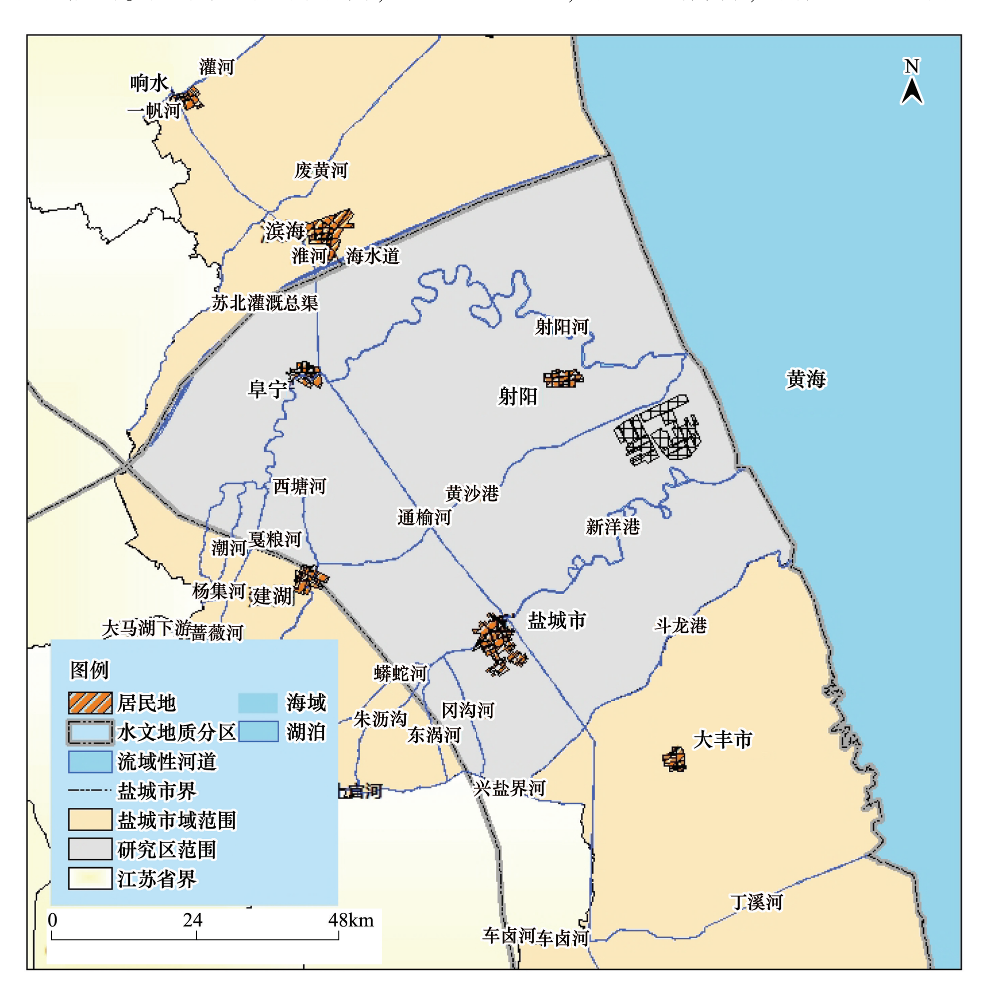


图 1　研究样区域范围和位置图

Fig.1　Location and extent of study area

1.2　研究区水文地质条件

研究区承压地下水主要赋存于松散沉积岩层孔隙中,埋深在 50—350 m 之间(图 2)。含水层多为由砂岩、砾石或灰岩组成松散沉积岩层,含水量充沛[13-14],水量稳定。不同的含水层之间由粘土或淤泥质粘土层形成隔水层。根据沉积物时代、成因、地层结构以及水文地质特征,区内包含 5 个含水层组:第 I 含水层、第 II 含水层、第 III 含水层、第 IV 含水层和第 V 含水层,其中:孔隙潜水和微承压水主要接受大气降水和地表水、农业灌溉水入渗补给,排泄为蒸发和开采利用;第 Ⅰ 承压水、第 Ⅱ 承压水水质为微咸水、半咸水、咸水。下伏新近系地层中发育有第Ⅳ、第Ⅴ承压含水层组,接受上部越流补给和西中部山体的侧向补给,主要排泄方式为人工

开采。第Ⅲ承压含水层由下更新统中细砂、中粗砂组成,厚度多在 20.00—35.00 m,富水性较好,为研究区域地下水的主开采层,与人类关系较为紧密,故本文选取研究区内第 III 承压含水层作为研究对象[15]。

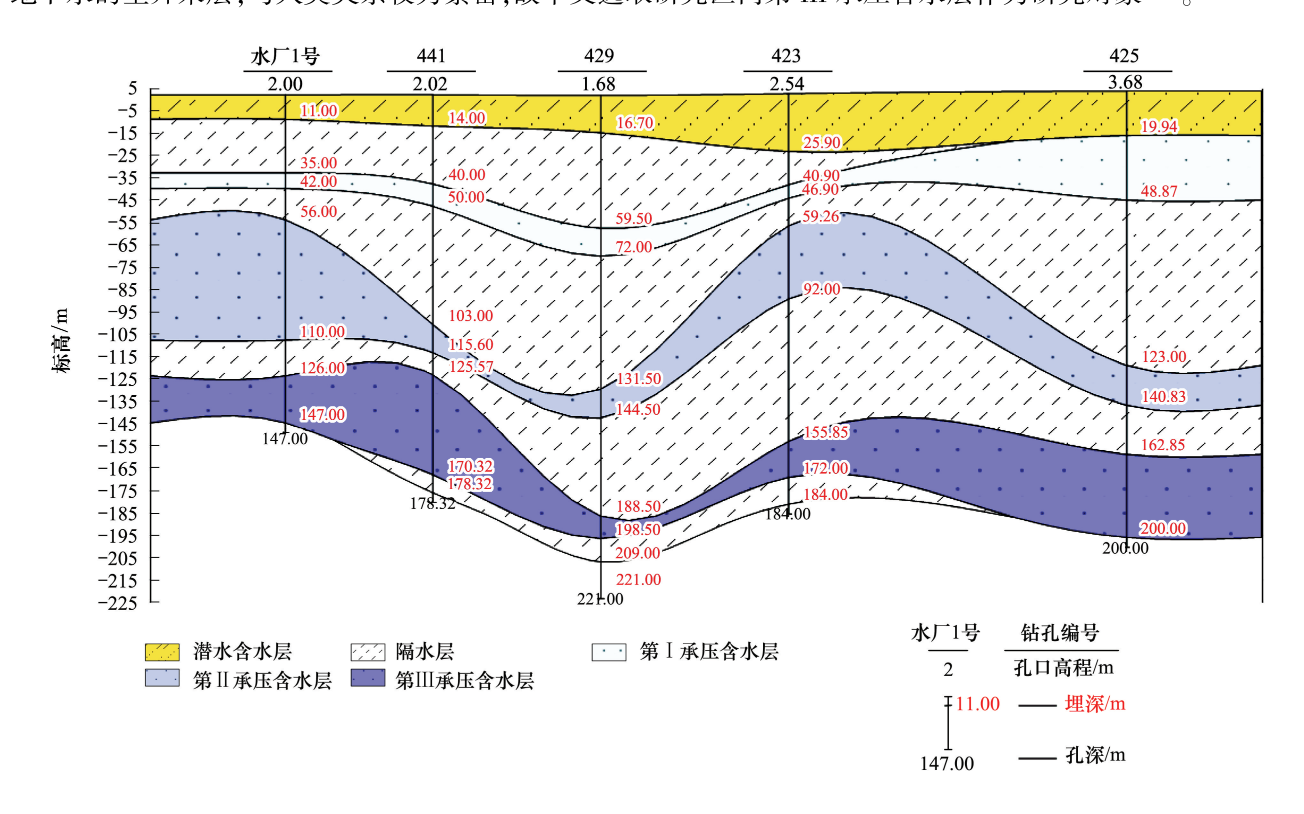


图 2　承压地下水埋藏条件示意图

Fig.2　Confined groundwater burial conditions schematic

2　研究数据获取与处理

2.1　数据来源

研究数据包括盐城市域范围内的 60 个水文地质钻孔勘探数据,提取水文地质钻孔中的第 III 承压含水层顶板埋深信息,制作含水层分布图,结合研究区地下水动态变化规律及含水层埋深分级专题图,在研究范围内选定 18 个动态监测井,获取其在 2005—2014 年期间的水质监测数据。各钻孔和监测井的位置信息通过 GPS 获取,统一采用 3 度分带的西安 80 椭球、高斯克吕格投影坐标系。所选地下水监测井以及水文地质钻孔空间分布如图 3 所示。

2.2　水质因子分类

盐城滨海平原地下水质监测因子种类众多,根据区域地下水分布特征,参考《地下水环境质量标准》(GB/T14848-93)中水质因子分类标准[16],结合该地区水质监测实际及不同指标对工农业生产和人类生活的影响情况,选取矿化度、总硬度、总碱度、高锰酸钾指数和细菌总数 5 种因子作为本次地下水质影响因素分析的水质指标。

2.3　含水层埋深 DEM 生成与处理

对研究区内水文地质钻孔勘探的原始数据进行解译,生成水文地质钻孔标准化卡片;之后建立水文地质钻孔数据库,数据库结构如图 4 所示。

基于以上数据结构,设计地层埋深数据提取算法,从钻孔数据库中读取每个钻孔的位置坐标和地层埋深信息,形成原始的地层界面采样点;将采样点导入到 ArcGIS 中,调用空间插值工具建立地层界面不规则三角网模型(TIN),并将该模型栅格化后与研究区范围图层进行求交运算,即得研究区含水层顶板高程 DEM 模

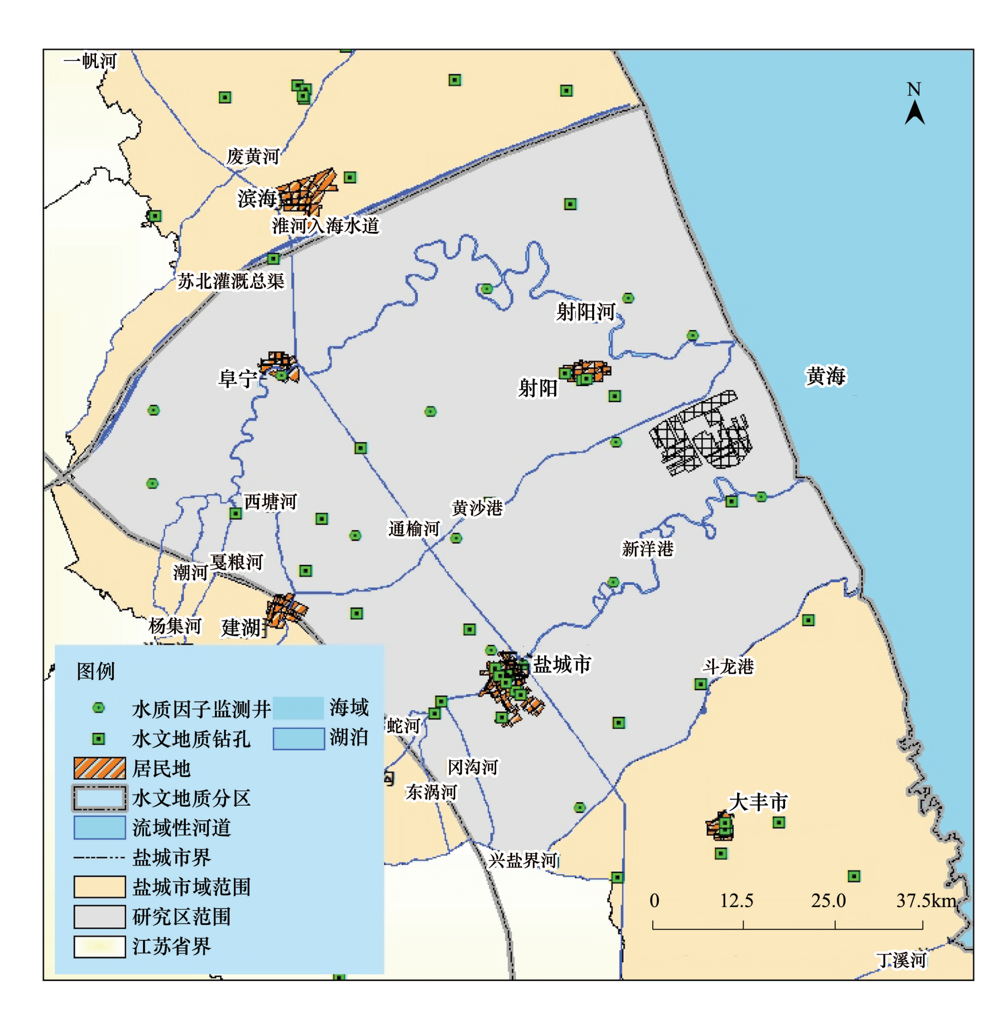


图 3　水文地质钻孔和地下水监测井空间分布图

Fig.3　Spatial distribution map of hydro-geological bore and groundwater monitoring well

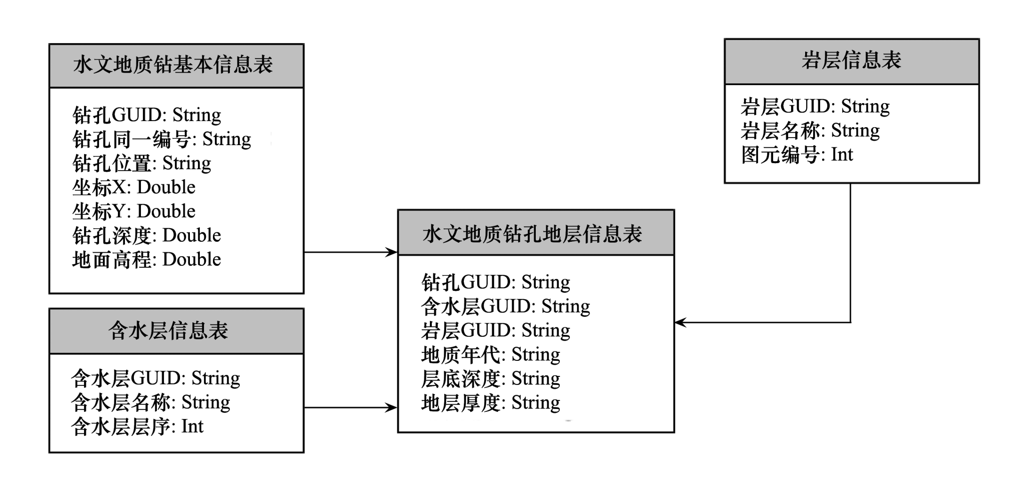


图 4　研究区水文地质钻孔数据库结构

Fig.4　Hydro-geological bore database structure

型。兼顾建模面积及埋深值的分异情况,设定 DEM 的栅格单元大小为 500 m×500 m。为研究埋深和水质之间的相关性,对连续的埋深值进行分级。研究区第 III 承压含水层顶板高程最大为－55.19 m,最小值为－160.87 m。基于水质监测井空间分布图进行分级试验,划分为 10 个等距区间即可较完整地展现了含水层空间分布特征,并使水质因子分布规律具有较好的区分度。研究区含水层埋深 DEM 及分级结果如图 5 所示。

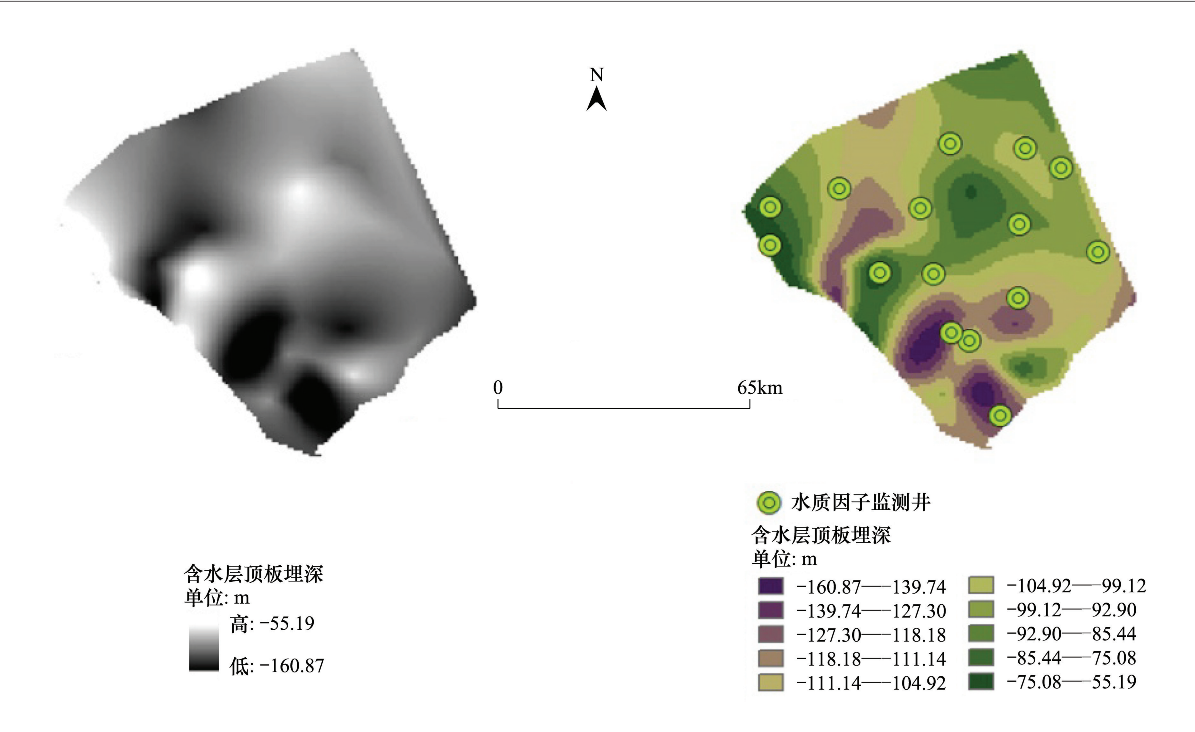


图 5　第 III 承压含水层顶板 DEM 及分级图

Fig.5　Aquifer III roof burial depth DEM and its classification

2.4　水质因子监测数据分析与处理

2.4.1　基于时间的单井数据处理

研究区第 III 承压含水层埋藏较深,地质构造封闭,地下水环境稳定,水质变化平稳,当地水利管理部门自 2005 年以来,每年仅对水质进行 1—2 次采样,且大多数年份中仅进行 1 次采样。考虑到水质变化的平稳性和季节性,为便于分析,默认每年仅采样 1 次,若某年份包含 2 次采样,约定取 2 次采样值的平均作为当年采样值。如表 1 为经过处理后的 1#监测井水质因子监测数据。

表 1　1#井监测数据结构

Table 1　Monitoring well 1# data structure

监测因子 Monitoring factor	监测年份 Monitoring year									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
矿化度 Mineralization degree/(g/L)	0.78	0.67	0.53	0.55	0.86	0.61	0.54	0.91	0.87	0.82
总硬度 Total hardness/(mg/L)	244	185	169	141	147	159	208	210	207	96.90
总碱度 Total alkalinity/(mg/L)	436	448	433	554	392	421	485	491	446	474
高锰酸钾指数 Permanganate indx/(mg/L)	1.20	0.30	1.60	0.80	0.80	0.40	0.90	0.70	0.80	1.20
细菌总数 Total bacterial count	20	10	13	20	10	30	15	20	15	10

2.4.2　基于空间的监测数据统计处理

不同的埋深分级区域面积及分布差异显著,所包含的监测井个数各不相同。为此将这些监测井历年所有监测数据作为样本。为保证埋深分级高程值的连续,将少数不包含监测井的埋深分级区间归并到相邻区间内,处理后得到 9 个有效的分级区间(表 2)。调用 GIS 叠置分析工具,获取每个分级区间内部的监测井。形成如表 2 所示的水质因子监测数据结构。

表 2　有效埋深分级及等效水质采样数据结构

Table 2　Valid burial depth classification interval and equivalent water quality sample data structure

采样年份 Sampling year	有效埋深分级区间 Valid depth classification intervals/m								
	-160.8—-150.30	-150.30—-139.74	-139.74—-129.17	-129.17—-118.60	-118.60—-108.03	-108.03—-86.89	-86.89—-76.32	76.32—-65.76	65.76—-55.19
2005	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	Q_{14}	Q_{15}	Q_{16}	Q_{17}	Q_{18}	Q_{19}
2006	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}	Q_{24}	Q_{25}	Q_{26}	Q_{27}	Q_{28}	Q_{29}
2007	Q_{31}	Q_{32}	Q_{33}	Q_{34}	Q_{35}	Q_{36}	Q_{37}	Q_{38}	Q_{39}
2008	Q_{41}	Q_{42}	Q_{43}	Q_{44}	Q_{45}	Q_{46}	Q_{47}	Q_{48}	Q_{49}
2009	Q_{51}	Q_{52}	Q_{53}	Q_{54}	Q_{55}	Q_{56}	Q_{57}	Q_{58}	Q_{59}
2010	Q_{61}	Q_{62}	Q_{63}	Q_{64}	Q_{65}	Q_{66}	Q_{67}	Q_{68}	Q_{69}
2011	Q_{71}	Q_{72}	Q_{73}	Q_{74}	Q_{75}	Q_{76}	Q_{77}	Q_{78}	Q_{79}
2012	Q_{81}	Q_{82}	Q_{83}	Q_{84}	Q_{85}	Q_{86}	Q_{87}	Q_{88}	Q_{89}
2013	Q_{91}	Q_{92}	Q_{93}	Q_{94}	Q_{95}	Q_{96}	Q_{97}	Q_{98}	Q_{99}
2014	Q_{101}	Q_{102}	Q_{103}	Q_{104}	Q_{105}	Q_{106}	Q_{107}	Q_{108}	Q_{109}
采样数 Sampling count	20	30	20	10	20	10	10	10	10

Q_{ij} 为描述第 i 年第 j 埋深区间某水质因子检测样本的变量

3　分析与讨论

3.1　第 III 承压含水层埋深分布基本特征

研究区水文地质钻孔数据和含水层顶板埋深 DEM 特征分析表明:整个研究区范围内第 III 承压含水层埋深在空间上差异较大,区内顶板高程最深处约为-160.88m,最浅处约为-55.19m,埋深变化明显。在研究区东部与北部的开阔滨海地区,含水层受沉积作用,走势平缓且埋深较浅;西部狭窄地带发育有西塘河、戛粮河等水系,构成平原水网,河流切割作用明显,引发含水层埋深显著变化。总体看来,含水层自西南向东北逐渐抬升,呈现出与地面高程大致相反的分布特征,蟒蛇河、东涡河流域地下水埋深变化明显且埋藏较深;至苏北灌溉总渠入海处趋于平缓、含水层埋深较浅。如表 3 所示,顶板高程位于-99.12 — -92.91m 的区域所占区域面积最广,达到整个研究范围面积的 21.45%,而顶板高程在-129.31 以下以及在-75.05 以上的区域,则仅占整个研究区域面积的 7.14%,大多分布于研究区范围中西部的山地地区。

表 3　第 III 承压含水层顶板高程分级及比例

Table 3　Aquifer III burial depth height classification and percentage

编号 Number	高程分级/m Elevation Classification	面积/km^2 Area	比例/% Percentage	编号 Number	高程分级/m Elevation Classification	面积/km^2 Area	比例/% Percentage
1	-160.8—-129.31	267.47	4.33	6	-99.12—-92.91	1324.76	21.45
2	-127.31—-118.19	398.72	6.45	7	-92.91—-85.45	872.8	14.13
3	-118.9—-111.14	650.46	10.53	8	-85.45—-75.09	453.5	7.34
4	-111.14—-104.92	975.63	15.79	9	-75.09—-55.19	173.62	2.81
5	-104.92—-99.12	1060.15	17.16				

3.2　含水层埋深对水质因子影响显著性分析

3.2.1　提出假设

为检验含水层埋深对水质因子是否有显著影响,首先提出“埋深与水质因子含量之间没有显著相关关系”的假设。即检验的 9 个区间所对应的 10a 的等效监测值(总体)的均值是否相等,提出如下形式的假设:

$$H_0 \quad \mu_1 = \mu_2 = \ldots \mu_i = \ldots = \mu_9$$
$$H_1 \quad \mu_i (i = 1,2,\cdots,9) \text{ 不全相等} \tag{1}$$

式中，μ_i为第 i 个分级区间水质因子监测样本的总体均值，H_0为原假设含义为：不同埋深分级区间内的水质因子监测值总体均值相等，埋深对水质无显著的影响；H_1表示含水层埋深与水质之间存在相关关系。如原假设被拒绝，表明埋深对水质有显著影响，二者之间存在显著相关关系；如不拒绝原假设，则无法充分证明二者之间存在显著相关关系。

3.2.2 ANOVA 分析

ANOVA 方法是一种利用抽样数据检验多个总体均值是否相等的统计方法，通过计算抽样数据的总误差平方和(SST)、水平项误差平方和(SSA)以及误差项平方和(SSE)，构造检验的统计量，实现分类型自变量对数值型因变量的影响研究[17]。将经过了时间和空间上处理后的水质采样数据导入 SPSS 中，调用 ANOVA 分析模块，对 H_0假设进行相关关系的显著性检验，显著性水平 α 设为 0.05，分析结果如表 4 所示。

表 4 水质因子监测数据 ANOVA 分析结果

Table 4 ANOVA result table of water quality monitoring data

监测因子 Monitoring Factor	平方和(SS) Sum of Squares		均方(MS) Mean Square		F	P	临界值 F-Script (Threshold)
	埋深(SSA) Depth (Squares Sum of Variance)	其它(SSE) Others (Squares Sum of Error)	埋深(MSA) Depth (Mean Squares of Variance)	其它(MSE) Others (Mean Squares of Error)			
矿化度/(g/L) Mineralization Degree	8.71	9.24	1.09	0.07	15.44	0.0000071	2.01
总硬度/(mg/L) Total Hardness	204499.19	627479.33	25562.40	4789.92	5.34	0.0000083	2.01
总碱度/(mg/L) Total Alkalinity	465455.34	345592.02	58181.92	2638.11	22.054	0.0000054	2.01
高锰酸钾指数/(mg/L) Permanganate Index	7.03	49.40	0.88	0.38	2.33	0.023	2.01
细菌总数/(个/L) Total Bacterial Count	26551.98	52141.82	3319.00	398.03	8.34	0.0000042	2.01

上表中给出了埋深(自变量)引起的误差和平方和(SSA)，度量了埋深对水质因子的影响效应。SSE 反映了有其它因素导致的误差平方和，这些因素包括采样误差、地下水流速以及含水层岩性、海水入侵、含水层厚度等。SSA 相较于 SSE 越大，说明埋深因素对该项水质因子的影响越显著；反之，其它因素对该因子的影响则越显著。可采用如下公式[18]对埋深和水质因子含量之间的关系强度进行衡量。

$$R^2 = \frac{SSA}{SST} = \frac{SSA}{SSE+SSA} \tag{2}$$

式中，R^2表示埋深误差平方和占总误差平方和的比例大小，其平方根 R 即度量了两个变量之间的关系强度。

3.2.3 相关关系的统计决策与量测

根据方差分析原理和分析结果，显著水平 $\alpha = 0.05$ 时，在 F 分布表中查找分子自由度为 8，分母自由度 131 的相应临界值 $F_\alpha = 2.01$。使用公式(3)计算抽样分布的检验统计量 F，并将其与临界值 F_α进行比较。

$$F = \frac{MSA}{MSE} = \frac{SSA/(k-1)}{SSE/(n-k)} \tag{3}$$

若 $F>F_\alpha$，则拒绝原假设 H_0，得出含水层埋深对水质因子含量有显著影响；若 $F<F_\alpha$，则不拒绝原假设 H_0，此时不能认为含水层埋深对水质有影响。由表 4 中计算结果知，矿化度、总碱度以及细菌总数 3 项水质因子采样数据的统计量值较大，分别为 15.44、22.054 和 8.34，均远远超过检验临界值 F_α，表明这 3 项水质因子受埋深影响较显著；高锰酸钾指数和总硬度因子的统计量值为分别为 2.33 和 5.34，略大于 F_α，表明这两项因子受含水层埋深影响较小，但依然有一定程度的影响。将表 5 中的计算结果代入公式(2)中，计算各水质因子与含水层埋深之间的关系强度。其中，矿化度、总碱度和细菌总数的 R^2值分别为 48.53%、57.39%和 33.74%，即：含水层埋深对这 3 项水质因子含量的影响效应占总效应的比例分别为 48.53%、57.39%和 33.74%；总硬度

的 R^2 值为 24.58%,表明含水层埋深因素对总硬度变异的解释比例仅为 24.58%,相较于矿化度和总碱度,这一比例并不高,但表征总硬度和埋深之间关系强度的 R 值为 49.18%,说明二者间也有接近中等程度的相关关系。对于矿化度、总碱度和细菌总数 3 项因子,相应的 R 值分别为:69.67%、75.76%和 58.09%,表明这 3 项因子与埋深因素之间有中等以上的强相关关系。与之对应,高锰酸钾指数的 R^2 值为 12.44%,其平方根 R 值为 35.27%,表明含水层的埋深对高锰酸钾指数影响作用不明显,二者之间的相关性较弱。

3.2.4　基于 LSD 的多重比较分析

由以上分析知,选取的 5 种水质因子含量与埋深的关系均达到了统计上显著的程度,但无法回答水质因子在哪几个高程分级区间之间差异最明显的问题。为此引入多重比较[19-20]方法对上述 5 种水质因子监测数据做进一步分析:对总体均值进行配对比较,检验不同水质因子含量均值之间差异的显著程度。多重分析方法中应用较广泛的是最小显著差异法(LSD),其利用 t 检验对各分组数据进行配对比较,敏感性高,可检验出不同总体水平之间的微小差异[21]。本文基于 LSD 对水质因子监测数据进行如下分析:

第一步　设检验显著水平 $\alpha = 0.05$,鉴于研究区共划分 9 个不同的高程分级,且不同的分级之间高程从低到高连续分布的特点,提出 8 组检验假设,第 i 组检验假设可描述为:

$$\begin{aligned} &H_0 \quad \mu_i = \mu_j, \\ &H_1 \quad \mu_i \neq \mu_j; (j = i + 1) \end{aligned} \tag{5}$$

第二步　计算各水质因子的检验统计量($|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$)和最小显著差异值(LSD)。LSD 值的计算公式如下[22]:

$$\mathrm{LSD} = t_{\alpha/2}\sqrt{\mathrm{MSE}\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \tag{6}$$

式中,n_i 表示第 i 个分级区间监测样本容量,$t_{\alpha/2}$ 为自由度($n - k$)的 t 分布的临界值,n 为所有因子监测样本总数,k 为埋深分级数。由表 5 中的计算结果知,5 类水质因子采样数据的 MSE、样本容量各不相同,需分别计算。t 分布自由度为 131,查 t 分布表可知临界值 $t_{\alpha/2} = t_{0.025} = 1.980$。结合公式(6)及检验统计量,算得各水质因子多重分析结果如表 5 所示。

表 5　多重比较分析结果

Table 5　Multiple comparative analysis result

检验组 Test Group	矿化度 Mineralization degree		总硬度 Total Hardness		总碱度 Total Alkalinity		高锰酸钾指数 Permanganate Index		细菌总数 Total Bacterial Count	
	$\lvert\bar{x}_i - \bar{x}_j\rvert$	LSD	$\lvert\bar{x}_i - \bar{x}_j\rvert$	LSD	$\lvert\bar{x}_i - \bar{x}_j\rvert$	LSD	$\lvert\bar{x}_i - \bar{x}_j\rvert$	LSD	$\lvert\bar{x}_i - \bar{x}_j\rvert$	LSD
检验 1 Test1	0.149	0.152	73.665	39.584	41.233	29.358	0.045	0.351	20.433	11.403
检验 2 Test2	0.224	0.152	57.790	39.584	68.867	29.358	0.025	0.351	13.0834	11.403
检验 3 Test3	1.001	0.204	106.880	53.073	144.200	39.387	0.185	0.471	17.85.	15.299
检验 4 Test4	0.780	0.204	71.045	53.073	138.910	39.387	0.045	0.471	8.500	15.299
检验 5 Test5	0.139	0.204	69.185	53.073	2.090	39.387	0.095	0.471	2.900	15.299
检验 6 Test6	0.191	0.235	38.770	61.284	33.200	45.481	0.690	0.544	14.400	17.666
检验 7 Test7	0.245	0.235	25.140	61.284	75.200	45.481	0.250	0.544	1.100	17.666
检验 8 Test8	0.128	0.235	29.430	61.284	189.800	45.481	0.630	0.544	11.200	17.666

第三步　决策与分析。比较各检测的检验统计量和 LSD 值。如统计量值比 LSD 值大,则拒绝原假设,该检验中的两个埋深分级之间的水质因子含量存在显著差异;否则不拒绝原假设,认为两个埋深分级之间水质差异不显著。由表 5 中的结果知,差异较为显著的检验有如下几组:矿化度因子第 2、3、4、7 组检验,总硬度因子前 5 组检验,总碱度因子第 1—4、7、8 组检验,高锰酸钾指数第 6、8 组检验以及细菌总数因的第 1—3 组。对照表 3 中的高程分级数据可知:矿化度、总硬度以及细菌总数 3 类因子在含水层埋藏较深区域 −160.8—−99.12 m之间受埋深影响显著,其对应的空间分布范围面积占到了整个研究区的 54.26%;总碱度因子在含水

层埋藏较深或较浅处(约占研究区面积 47.26%)均表现出随埋深变化的特征;高锰酸钾指数因子仅对特定的埋深-99.12—-92.91 m 和-85.45—-75.09 m 之间表现出显著的差异,但其在空间上分布范围面积仍占到了总面积的 31.6%,表明在研究区内部接近 1/3 的区域,高锰酸钾指数因子的含量与该位置含水层埋深呈现出一定程度的相关性。

3.3 水质因子随埋深变化的分布与演变特征

为反映水质因子在空间和时间上随埋深的变化特征,首先统计每个埋深分级区内包含的监测井,并计算位于同一埋深分级区间的所有监测井在指定年份所有监测数据的平均值。以该值代表该年份下该埋深分区内的水质情况,绘制在 2005 年和 2014 年份的矿化度、高锰酸钾指数、总硬度、总碱度以及细菌总数 5 类水质因子随埋深分级变化的统计曲线图,如图 6 所示。

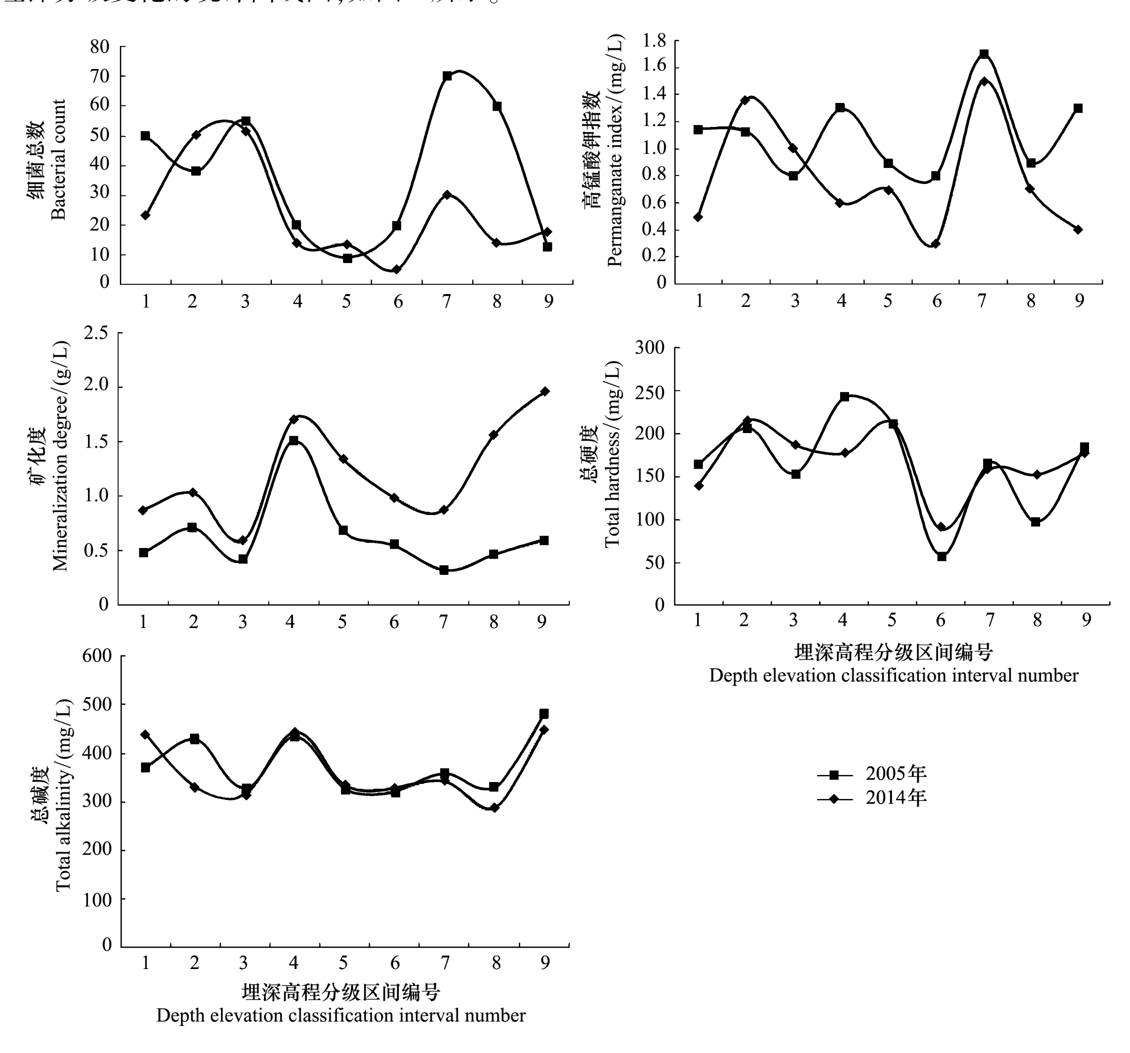


图 6 不同年份水质因子随含水层埋深变化曲线

Fig.6 Different water quality curve alone with aquifer burial depth variance

对图 6 进行分析可见,研究区第 III 承压地下水各水质因子从整体上看,高锰酸钾指数、细菌总数以及矿化度在 2005—2014 年间变化程度较大,总碱度和总硬度变化程度较小;在含水层埋深较浅区域,高锰酸钾指数、细菌总数在 05 年和 14 年均达到了峰值,说明水体污染有加重的趋势。对照表 4 可知:(-92.91,-85.45)是高锰酸钾指数的优势分布埋深区间,而埋藏更浅的(-85.45,-75.09)则是细菌总数优势分布埋深区间,从 2005—2014 年,高锰酸钾指数在多数区间均呈现出上涨的趋势,细菌总数在含水层埋深小于 104.92m 的区域表现出较为显著增长趋势,这是由于浅层地下水受人类生活废弃物排放影响的加深,地下水体中有机物污染物含量上升导致。

(-118.9,-99.12)是矿化度、总硬度和总碱度因子的优势分布埋深区间,较之于高锰酸钾指数和细菌总数两项因子,前三者在 2005—2014 年间的变化并不算显著,但对埋藏高程位于-104.92—-99.12 m 以上的含水层中的地下水体,归因于东部含水层埋藏较浅的滨海区域历年来地下水开采强度的不断增加、海水入侵程度逐渐加强,由于海相冲积,地下水含盐量通常较高,尤其是东部的垦区及滩涂地区的浅层地下水,其矿化度含量在近 10a 来表现出较明显的增长趋势(10a 增加了 1.5mg/L),从而导致水体趋咸。

与矿化度类似,总硬度因子在含水层埋藏较浅区域表现出小幅增长,表明该区地下工业生产用水面临威胁;总碱度因子在含水层埋藏较浅及位于区间(-111.14,-104.92)的区域含量较高,区内水体的缓冲能力较强,具有较好的金属溶解性和解毒能力、适宜于农田灌溉,但由于地下水开采导致的水位降落以及水量减少等原因,其含量值在整体稳定的趋势中显露出轻微的降低迹象,应引起重视。

4　结论与讨论

本文结合研究样区水质监测实际和地下水利用现状,分析了承压孔隙地下水典型水质因子的空间分布及动态变化对含水层埋深因素的响应特征,得到如下几点结论:

(1)研究区第 III 承压含水层为区内地下水的主开采层,其埋深在空间上分布较不均匀,呈现出自西向东逐渐抬升的趋势;西南部地区埋深变化显著,中部和东北部地区埋深变化较为平缓,大多数区域含水层埋深位于-118.9— -85.45 m 之间,占到整个研究区比例的 60%以上;

(2)第 III 承压含水层地下水质与含水层埋深因素之间呈现出较显著的相关关系。矿化度、总碱度和细菌总数 3 种因子与埋深的关联强度最高,相应的 R 值分别为 69.67%、75.76%和 58.09%;总硬度因子的关联强度达到了接近中等的水平(R = 49.18%);高锰酸钾指数受埋深影响有限,测度其与埋深因素关联强度的 R 值为 35.27%;

(3)含水层埋藏较深的区域总硬度、矿化度和细菌总数受埋深因素影响较为显著,对应埋深高程分布于-160.8— -99.12 m 之间(约占总面积的 54.26%);埋深较浅区域(约占总面积的 47.26%)总碱度受埋深因素影响显著;高锰酸钾指数仅在特定的埋深区间(-99.12— -92.91 m 和-85.45— -75.09 m)表现出显著的差异,其对应的含水层分布范围占到了研究区总面积的 1/3;

(4)高锰酸剂和细菌总数在埋深位于-85.45— -75.09 m 之间的地下水中含量较高,主要分布于射阳县至黄沙港之间,近年来在人类开采和废弃物排放影响下呈现增长趋势。矿化度因子含量在中西部地区含水层中出现峰值,近年来随着滨海盐田开发及海水入侵等原因有所增长,对居民的生活饮用产生不利的影响。总碱度和总硬度因子总体变化不大,其分布优势埋深区间为-111.14— -104.92 m,在埋深较浅区域,总碱度呈轻微下降、总硬度则表现出一定的上涨趋势,表明东部地下水在工农业生产方面的适宜程度或受影响,应采取一定的防控措施。

(5)影响地下水水质的因素包括地下水流速、上层越流、海水入侵以及岩性和水理性等[23]。对研究区内其它因素进行提取量化、并进行多个因素影响下联合分析,是未来研究的方向。

参考文献(References):

[1] 朱学愚,钱孝星.地下水水文学.北京:中国环境科学出版社,2005.

[2] 王浩,陆垂裕,秦大庸,桑学锋, 李扬, 肖伟华.地下水数值计算与应用研究进展综述.地学前缘,2010,17(6):1-12.

[3] ZhangY X, Liu J T, Zhang Y J. Hydro-chemical evolution of shallow and deep groundwater in Tongchuancity, China. Journal of coastal research, 2015,73(S):436-442.

[4] 陈锁忠,常本春,黄家柱.水资源管理信息系统.北京:科学出版社,2006.

[5] 付延龄.盐城市地下水资源预测评价.资源调查与环境,2005,26(1):54-59

[6] 陈红卫,盐城市降水特性分析.水文,2000,(20):62-65.

[7] 卞锦宇,方瑞.盐城市地下水水质控制因素分析.水文地质工程地质,2003,(5):56-60.

[8] 廖资生,林学钰.松嫩盆地的地下水化学特征及水质变化规律.地球科学-中国地质大学学报,2004,29(1):96-102.

[9] 韩银利,尹秉喜,余秋生,于艳青等.应用电性特征研究银川平原地下水水质空间分布规律.物探与化探,2008,32(3):288-290.

[10] Tang C Y, Sakura Y. The characteristics of geochemistry in a headwater wetland, Chiba, Japan. Proceedings of Symposium S4 held during the 7th IAHS Scientific Assembly. Foz do Iguacu, Brazil: IAHS, 2005, 294: 167-175.

[11] Serhal H, Bernard D, El Khattabi J, Sabine B L, Shahrour I El. Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. Environmental geology,2009,51(7):1579-1592.

[12] 凌家荣,钱庆龙,冯志祥.盐城市地下水资源调查评价.水利水电科技进展,2000,20(3):48-50.

[13] 骆祖江,武永霞.盐城市地下水资源规划评价三维数值模型.水资源保护,2005,21(5):37-41.

[14] 陈锁忠,黄家柱,张金善.基于 GIS 的孔隙水文地质层三维空间离散方法.水科学进展,2004,15(5):634-639.

[15] 顾锋.盐城市水资源状况及其问题.水文,2003,23(2):53-55.

[16] 国家技术监督局. GB/T 14848-1993 地下水质量标准. 北京: 中国标准出版社, 2004.

[17] Mengali U, Morelli M. Data-aided frequency estimation for burst digital transmission. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(1): 23-25.

[18] 解悦.高维方差分析.长春:东北师范大学,2014.

[19] Benjamini Y, Liu W. A step-down multiple hypotheses testing procedure that controls the false discovery rate under independence. Journal of statistical planning and inference,1999,82(1/2):163-170.

[20] Hochberg Y, Tamhane A C. Multiple Comparison Procedures. New York: Wiley, 1987.

[21] 盛骤,谢千式,潘承毅.概率论与数理统计.北京:高等教育出版社,2008.

[22] 贾俊平.统计学.2 版. 北京:清华大学出版社,2006.

[23] Hudak P F. 水文地质学原理. 郭清海, 王知悦, 译. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2010.